

防波堤上に設置された洋上風力発電タワーの風力を考慮した地震時動的応答解析

早稲田大学大学院 学生員 ○岡田祐
早稲田大学 フェロー 清宮理

1.はじめに 自然エネルギーの有効利用の観点から風力発電に注目が集まっている．しかし，景観や騒音などの環境上の問題や，風車規模の大型化が進んだことなどにより，立地場所に様々な制約を受けるようになり，沿岸域及び洋上風力発電開発が進められている．その建設場所としては大水深海域や在来防波堤上が挙げられるが，後者の防波堤施設は既存のものであり，またメンテナンスも容易であることから，コストパフォーマンス的に非常に優れていると言える．このことから風力発電タワーを在来防波堤上に設置することが有望であると考えられる．ところで地震大国と呼ばれるわが国においては，耐震性の検討が不可欠となる．地震により在来防波堤施設の受ける影響次第で，防波堤の構造を再確認，もしくは補強することが必要不可欠となる．本研究では動的地震応答解析により防波堤，及び防波堤上に風力発電タワーを設置した場合の挙動を調べ，耐震設計の基礎資料とした．

2.実験方法及び計算方法 高さ 4.8m，奥行き 12m のマウンド（基礎捨石）上に高さ 18m，横幅 20m，奥行き 12m のケーソン式基礎，及び円錐台の形状をした全長 60.8m，重量 1677kN，発電能力 1.65MW のタワーからなる図 1 の風力発電施設を本研究の解析対象とした．有限要素法汎用プログラム T-DAP を用いて防波堤施設の場合，及び風力発電タワーを設置した場合をそれぞれ図 2，図 3 のようにモデル化し，地震荷重及び風荷重を入力し各挙動を調べた．尚，鋼管の材料特性を表 1 に示す．また，表層地盤は平面ひずみ要素に置換し，地盤の非線形性は R-O モデルで表現した．工学的地盤面を -20m とし，0m ~ -13m の区間を $\gamma=18.62 \text{ kN/m}^3$ ，減衰定数 0.134， $G_0=77527.8 \text{ kN/m}^2$ ，ポアソン比 0.49 の砂質土，-13m ~ -20m の区間を $\gamma=19.6 \text{ kN/m}^3$ ，減衰定数 0.134， $G_0=174048 \text{ kN/m}^2$ ，ポアソン比 0.49 の粘性土とした．入力地震波は兵庫県南部地震におけるポートアイランド波（PI 波）を用い，入力加速度 200Gal，400Gal，600Gal，679Gal の 4 種類について，また風荷重は静的荷重として 7m/s（カットイン風速），17m/s（定格風速），25m/s（カットアウト風速），36m/s（暴風風速）の 4 種類について設計計算した．



図 1 風力発電施設

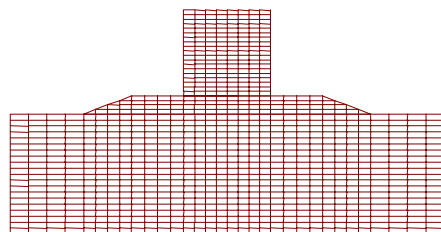


図 2 ケーソン式基礎解析モデル

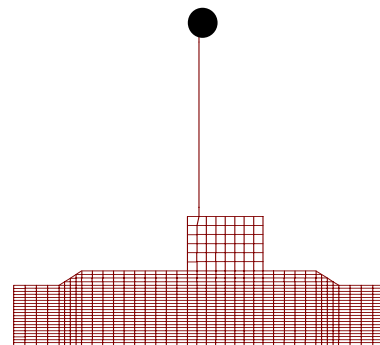


図 3 風力発電施設解析モデル

表 1 タワーの材料特性

タワー長	60.8m	ポアソン比	0.3
タワーの重量	892.44kN	質量密度	77 kN/m ³
タワー基部の直径	4025mm	減衰比	0.02
タワー基部の板厚	28mm	材料モデル	線形弾性
タワー頂部の直径	2310mm	降伏モーメント(基部)	72000kN・m
タワー頂部の板厚	17mm	全断面塑性モーメント(基部)	91000kN・m
材質	SM400	降伏モーメント(頂部)	16700kN・m
ヤング率	$2.1 \times 10^8 \text{ kN/m}^2$	全断面塑性モーメント(頂部)	21000kN・m
降伏強度	235kN/m		

3.地震による在来防波堤への影響 タワーを設置しない状態のケーソン式基礎に 200Gal，400Gal，600Gal，679Gal の各入力地震波を与えたところ，応答変位は順に 12.3cm，25.5cm，38.9cm，44cm と，応答加速度は順に 96Gal，175.8Gal，248.1Gal，275Gal と算出された．

4.風速をパラメータとした入力加速度の増加による断面力の変化 風速をパラメータとした，入力加速度の増加による断面力の変化を図 4～9 に示す．基部は風速の違いに寄らず，ほぼ一定の応答変位値を示したのに対し，頂部の応答変位値は風速の違いによる影響が如実に現れる結果となった．このことから風荷重がタワーに対して及ぼす影響は非常に大きなものであると考えられる．応答加速度についてはタワー頂部・基部共に風速が異なってもほと

キーワード 洋上風力発電施設，ケーソン式基礎，動的応答解析

連絡先：〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1 清宮研究室 Tel.03-5286-3852

んど同じ値となった．頂部の値が若干，基部の値よりも大きい数値を示したのは，地表面からの高さによるものだと考えられる．曲げモーメント値は基部，頂部共に降伏・全断面塑性モーメント値を下回ったことから，地震と風の累加に対してもタワーは安全だと言える．またいずれの断面力の値も，カットアウト風速時の方が定格風速時を下回る結果となった．これはカットアウト時にはブレードの回転を止め、フェザリング状態にすることで作用する風荷重が小さくなっている為だと考えられる．

5. 結論 防波堤のみに地震波を作用させた場合と，防波堤上にタワーを設置した状態で風荷重及び地震波を作用させた場合との値はほとんど変わらなかった．値の違いは風荷重の有無によるものであると考えられるが，その差が微小だったことから，防波堤が受ける風荷重の影響はほとんど無いと言える．また，地震波によって防波堤が受ける影響もタワーの有無に関わらず小さい値を示したことから，風力発電タワーが極めて耐震性の高い柔構造物であることが確認された．

参考文献

1. 財団法人沿岸開発技術研究センター(平成12年11月):洋上風力発電基礎工法の技術(設計・施工)マニュアル(案)
2. 牛山泉著:風車工学入門 - 基礎理論から風力発電技術まで

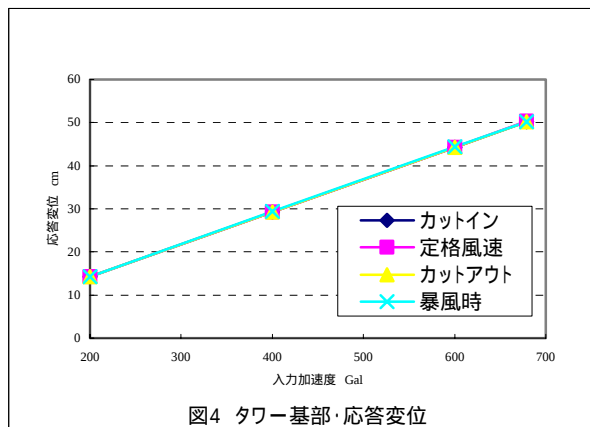


図4 タワー基部・応答変位

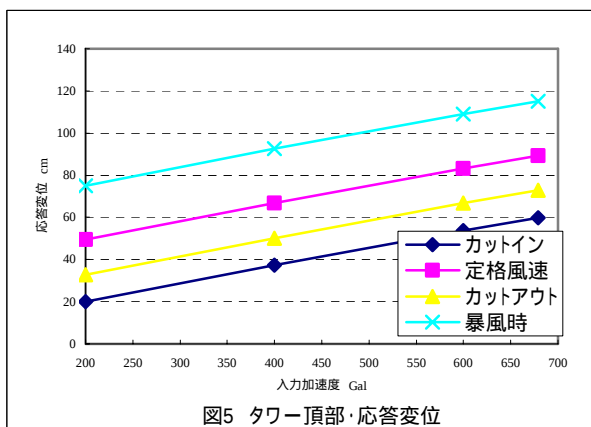


図5 タワー頂部・応答変位

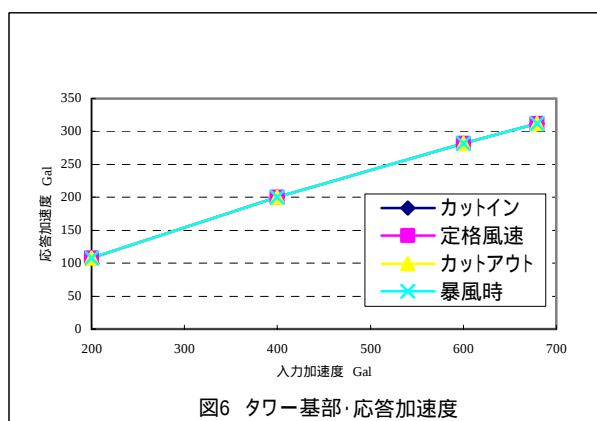


図6 タワー基部・応答加速度

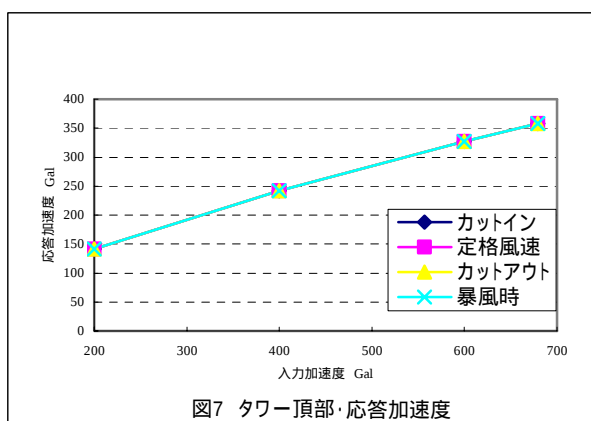


図7 タワー頂部・応答加速度

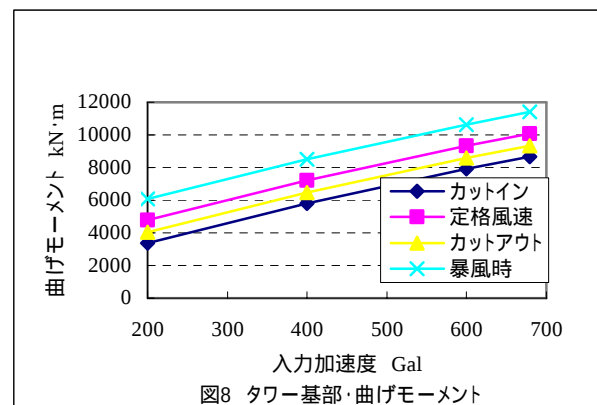


図8 タワー基部・曲げモーメント

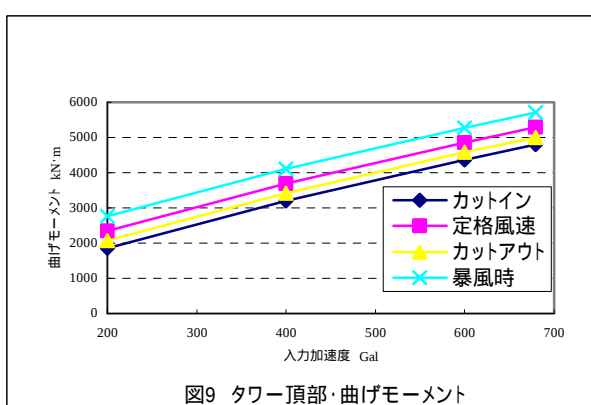


図9 タワー頂部・曲げモーメント